

Thermal Conductive Polyamide 6/Polyolefin Elastomer/ Aluminum Nitride/Aluminum Oxide Composites

Marjan Shahmir, Shervin Ahmadi*, Hassan Arabi

Iran Polymer and Petrochemical, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 7 May 2024, accepted: 1 September 2024

ABSTRACT

Hypothesis: Polyamide-based blends, like most polymers, are thermally insulating materials, which restrict their application. An effective method to improve the thermal conductivity of polymers is manipulating the morphology and locating conductive fillers selectively at the polymer interfaces to induce heat conduction path way. In this regard, blending polyamide 6 with polyolefin elastomer and fillers such as aluminum nitride (AlN) and aluminum oxide (Al₂O₃) is an effective method to improve the thermal conductivity and mechanical properties.

Methods: The effect of 10% (by wt) aluminum nitride and aluminum oxide fillers and their mixture (with a ratio of 2:1) and different particle sizes on the induction of the structure of both continuous phases and the thermal conductivity of the polyamide-6/polyolefin elastomer mixture (80/20) in the molten state was investigated.

Findings: The results demonstrated that a stable co-continuous structure was formed by selective localization of fillers in the PA6/POE interphase. The xenon flash analysis results showed that the thermal conductivity of samples containing 10% (by wt) of AlN or Al₂O₃ reaches 2.22 and 1.29 W/m.K, respectively, which are 4.8 and 3 times higher than the thermal conductivity of pure sample. However, in the samples containing 10% (by wt) AlN/Al₂O₃ mixture with a mass ratio of 2:1, thermal conductivity reaches 3.34 W/m.K which is 7.23 times higher than that of pure sample. It can also be pointed to the fact that the gap of large size particle (Al₂O₃) is filled by the small size filler (AlN), therefore, the contact surface area of irregular AlN particles and Al₂O₃ spherical particles increases, which in turn has a synergistic effect on improving the thermal conductivity of the composite. It can be confidently claimed that this is a promising approach for the design of thermally conductive composites with favorable properties, light weight, and low cost.

Keywords:

thermal conductive
composites,
polyamide-6/polyolefin
elastomer,
percolation threshold,
aluminum nitride,
aluminum oxide

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: Sh.Ahmadi@ippi.ac.ir

Please cite this article using:

Shahmir M., Ahmadi Sh., Arabi H., Thermal Conductive Polyamide 6/Polyolefin Elastomer/Aluminum Nitride/Aluminum Oxide Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 37, 85-96, 2024.

کامپوزیت‌های رسانای گرمایی بر پایه پلی‌آمید ۶-پلی‌اولفین الاستومر دارای آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید

مرجان شاهمیر، شروین احمدی*، حسن عربی

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۱

چکیده

فرضیه: آمیزه‌های بر پایه پلی‌آمید مانند اکثر پلیمرها عایق گرمایی هستند که این ویژگی بسیاری از کاربردهای آنها را محدود می‌کند. یک روش مؤثر برای بهبود رسانندگی گرمایی و خواص مکانیکی آمیزه‌های پلیمری، تغییر شکل‌شناسی و قراردادن گزینشی پرکننده‌های رسانای گرما در فصل مشترک فازها به منظور ایجاد مسیر رسانای گرماست. در این راستا، اختلاط پلی‌آمید ۶ با پلی‌اولفین الاستومر و پرکننده‌هایی مانند آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید راهکار موثری برای بهبود رسانندگی گرمایی و خواص مکانیکی آمیزه نام‌برده است. **روش‌ها:** اثر ۱۰٪ وزنی از پرکننده‌های آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید و مخلوط آنها (با نسبت ۲ به ۱) و اندازه ذرات مختلف بر القای ساختار هر دو فاز پیوسته و رسانندگی گرمایی آمیزه پلی‌آمید ۶-پلی‌اولفین الاستومر (۸۰/۲۰) در حالت مذاب بررسی شد. **یافته‌ها:** نتایج حاصل بیانگر تشکیل ساختار پیوسته پایدار با انتخاب گزینشی پرکننده‌ها بین دو فاز پلی‌آمید ۶-پلی‌اولفین الاستومر است. نتایج رسانش‌سنجی گرمایی نشان می‌دهد، رسانندگی گرمایی نمونه‌های دارای ۱۰٪ وزنی پرکننده آلومینیم نیتريد یا اکسید به ترتیب ۲/۲۲ و ۱/۲۹ W/m.K افزایش یافت که ۴/۸ و ۳ برابر بیشتر از نمونه خالص است. در حالی که، رسانندگی گرمایی در نمونه دارای ۱۰٪ وزنی از مخلوط پرکننده‌های آلومینیم نیتريد و اکسید با نسبت وزنی به ترتیب ۲ به ۱، به ۳/۳۴ W/m.K رسید که ۷/۲۳ برابر بیشتر از نمونه خالص است. زیرا، در این حالت ذرات پرکننده ریز، حفره‌های میان ذرات بزرگ را پر می‌کنند و موجب کاهش تخلخل بین پرکننده‌ها و افزایش سطح تماس ذرات بی‌شکل آلومینیم نیتريد و ذرات کروی شکل آلومینیم اکسید می‌شوند. بنابراین رسانندگی گرمایی سامانه به صورت هم‌افزایی افزایش می‌یابد. امید است، پژوهش انجام‌شده چشم‌انداز مثبتی برای طراحی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای گرمایی با خواص مطلوب، سبک و ارزان باشد.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت‌های رسانای گرمایی،
پلی‌آمید ۶-پلی‌اولفین الاستومر،
آستانه نفوذپذیری،
آلومینیم نیتريد،
آلومینیم اکسید

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
Sh.Ahmadi@ippi.ac.ir

مقدمه

پلی‌آمیدها از پلیمرهای پرمصرف در صنایع مختلف مانند خودروسازی، صنایع فضایی و بسته‌بندی مواد غذایی هستند. پلی‌آمیدها مانند اکثر پلیمرها عایق گرمایی بوده و اصلی‌ترین مشکل آن‌ها در بسیاری از کاربردها، رسانندگی گرمایی کم آن‌هاست. پلیمرهای رسانای گرما می‌توانند جایگزین فلزات، سرامیک‌ها و پلاستیک‌های مهندسی برای کاربردهای حساس به گرما شوند [۱]. امروزه یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد برای کنترل شکل‌شناسی و بهبود خواص آمیزه‌های پلیمری و ایجاد خواص جدید مانند رسانایی گرمایی، اضافه‌کردن پرکننده به آن‌هاست [۲،۳]. عوامل مختلفی از جمله شرایط اختلاط، تنش بین‌سطحی اجزای پلیمری، خواص رئولوژیکی، جزء حجمی اجزاء، نحوه جاگیری ذرات در سامانه، غلظت، هندسه و قابلیت ذرات به ایجاد ساختار می‌تواند اثر متفاوتی بر ریزساختار نهایی داشته باشد [۴،۵]. پژوهشگران برای بهبود رسانایی گرمایی مواد نارسا مانند پلیمرها، استفاده از انواع پرکننده یا اصلاح ساختاری آن‌ها را بررسی کرده‌اند [۶-۸]. به‌طور کلی، مقدار بهبود رسانندگی گرمایی پرکننده‌ها به عواملی مانند ساختار و ماهیت آن‌ها بستگی دارد. طی سالیان گذشته کاربرد پرکننده‌هایی مطالعه شده است که به بهبود رسانندگی گرمایی پلیمرها منجر می‌شوند. از جمله پرکننده‌های پایه کربنی (دوده و گرافن)، پرکننده‌های فلزی (نقره، مس، آلومینیم و...) و پرکننده‌های سرامیکی (بور نیتريد، آلومینا، آلومینیم نیتريد و...) [۹،۱۰]. بسیاری از پژوهشگران اثر نانولوله‌های کربن بر بهبود رسانندگی گرمایی پلیمرها را به دلیل رسانش پذیری گرمایی بسیار زیاد و نیز ارزانی و در دسترس بودن آن‌ها بررسی کرده‌اند [۱۱،۱۲]. نتایج آزمایش‌های اولیه بیانگر افزایش شایان توجه در خواص مکانیکی و الکتریکی پلیمرها بود [۱۳]. در حالی که نتایج رسانندگی گرمایی آن چنان که انتظار می‌رفت (نزدیک به نظری)، نبود. به عبارتی قابلیت رسانندگی گرمایی ذاتی زیاد یک نانولوله کربن به‌طور عمده به دلیل نقص و پراکندگی فونون، کاهش می‌یابد. Aliev و همکاران [۱۴] نشان دادند، چگونه اتصال‌های داخلی لوله‌ای، باعث ایجاد نقص و در نتیجه کاهش رسانندگی گرمایی مؤثر نانولوله کربن از مقدار نظری (۳۰۰۰ W/mK) به مقدار واقعی (۵۰ W/mK) می‌شود. Jia [۱۵] از گرافن و نانولوله‌های کربن برای افزایش رسانش پذیری گرمایی استفاده کردند و رسانش پذیری گرمایی را به ۳ W/mK ارتقا دادند. پرکننده‌های نام‌برده گزینه‌های مناسبی برای افزایش رسانش پذیری گرمایی در درصد‌های کم هستند. اما، قیمت زیاد گرافن و نانولوله‌های کربن و فرایند آماده‌سازی پیچیده آن‌ها، کاربردهای صنعتی آن‌ها را محدود کرده است. از طرفی، مواد بر پایه کربن باعث افزایش رسانندگی گرمایی و

الکتریکی به‌صورت هم‌زمان می‌شود و در مواردی که هدف فقط افزایش رسانندگی گرمایی باشد، کاربردی نخواهد داشت [۵]. در بسیاری از مقاله‌ها تأیید شده است، هرچقدر مقدار پرکننده رسانا بیشتر باشد، رسانایی ناشی از آن زیادتر خواهد بود. با وجود این، هیچ زمانی رسانش پذیری گرمایی به‌مقدار رسانایی پرکننده نخواهد رسید [۵]. Gaska و همکاران [۱۶] نشان دادند، برای اینکه رسانش پذیری گرمایی اپوکسی ۱۰ برابر افزایش یابد، باید حدود ۳۰٪ تا ۵۰٪ وزنی پرکننده آلومینیم نیتريد-سیلیسیم اکسید یا بور نیتريد-سیلیسیم اکسید به آن اضافه شود. Choi و همکاران [۱۷] از ۸۰٪ وزنی نانولوله کربن برای افزایش ۱۰ برابر رسانش پذیری گرمایی پلی‌اکریلات استفاده کردند. Lee و همکاران [۱۸] از ۵۷٪ وزنی آلومینیم نیتريد در ماتریس اپوکسی برای رسیدن به رسانش پذیری گرمایی ۳/۴ W/mK استفاده کردند. Altay و همکاران [۱۹] خواص گرمایی، الکتریکی و مکانیکی پلی‌آمید ۶ پُر شده با پرکننده‌های پودری را بررسی کردند. آن‌ها از پرکننده‌های آلومینیم نیتريد، بور نیتريد و گرافیت سنتزی استفاده کرده و مشاهده کردند، رسانش پذیری گرمایی نمونه‌های دارای بور نیتريد و گرافیت سنتزی در جهت درون‌صفحه‌ای (in plane) بیشتر از جهت میان‌صفحه‌ای (throughplane) است. Yuan و همکاران [۲۰] رسانش پذیری گرمایی پلی‌آمید ۶،۶ و پلی‌آمید ۶ و نیز آمیخته آن‌ها با افزودنی آلومینیم نیتريد را بررسی کردند. آن‌ها از ترکیب درصد‌های مختلف آلومینیم نیتريد در این آمیخته با نسبت ۱:۱ (پلی‌آمید ۶،۶-پلی‌آمید ۶) و نیز هر یک به‌تنهایی استفاده کرده و سپس ساختار بلوری آن‌ها را با گرماسنجی پویشی تفاضلی و میکروسکوپی پویشی جفت‌شده با طیف‌سنجی پاشنده انرژی پرتو X بررسی کردند. مشاهده شد، وقتی از آمیخته نام‌برده استفاده کردند، ذرات آلومینیم نیتريد به‌صورت گزینشی در فاز قرار می‌گیرند (به‌طور عمده در پلی‌آمید ۶۶) و بیشترین تماس بین ذرات آلومینیم نیتريد در این حالت به‌وجود می‌آید. آن‌ها ادعا کردند، با افزودن ۵۰٪ وزنی آلومینیم نیتريد به آمیخته نام‌برده رسانش پذیری گرمایی به ۰/۵ W/mK رسید و ۸۸٪ نسبت به پلی‌آمید ۶،۶ و پلی‌آمید ۶ خالص افزایش یافت. Xiao و همکاران [۲۱] رسانش پذیری آلومینیم نیتريد-نانوکربن لوله چنددیواره را در آمیخته امتزاج‌ناپذیر پلی‌آمید ۶،۶ پلی‌کربنات بررسی کرده و مشاهده کردند، آلومینیم نیتريد و نانوکربن لوله چنددیواره به‌صورت گزینشی در فاز پلی‌آمید ۶،۶ قرار می‌گیرند و بدین ترتیب توانستند، با افزودن حدود ۲۵٪ وزنی از این پرکننده، رسانش پذیری گرمایی را شش برابر بیشتر از آمیخته پلی‌آمید ۶،۶-پلی‌کربنات خالص و دو برابر بیشتر از آمیخته پلی‌آمید ۶-پلی‌کربنات-آلومینیم نیتريد افزایش دهند. Li و همکاران [۲۲] اندازه

ذرات پرکننده آلومینیم نیتريد و آلومینا را بر رسانش‌پذیری گرمایی پلی‌آمید بررسی کردند و نشان دادند، وقتی از ذرات پرکننده با اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود، رسانش‌پذیری گرمایی پلی‌آمید بیشتر از زمانی است که اندازه‌ها یکسان باشند، زیرا ذرات پرکننده ریزحفره‌های بین پرکننده‌های بزرگ را پر می‌کنند و باعث کاهش تداخل بین پرکننده‌ها و افزایش مقدار فشردگی شده که در نتیجه باعث تشکیل زنجیره گرمایی می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند، وقتی نسبت وزنی پرکننده‌های با اندازه کوچک و بزرگ ۱:۲ باشد، رسانش‌پذیری گرمایی کامپوزیت بسیار افزایش می‌یابد. هدف این پژوهش، افزایش رسانش‌پذیری گرمایی آمیخته پلی‌آمید ۶- پلی‌اولفین الاستومر با نسبت به ترتیب ۸۰ به ۲۰ است. در گام اول به منظور طراحی آمیخته پلیمری با رسانش‌پذیری گرمایی مطلوب و یکنواخت در تمام جهت‌ها، از پرکننده آلومینیم نیتريد و نیز آلومینیم اکسید استفاده شد و با در نظر گرفتن تمایلات ترمودینامیکی پرکننده‌ها از راهکار کاهش آستانه اتصال استفاده شد. یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش آستانه اتصال، تهیه آمیخته‌های دوتایی یا چندتایی و پخش پرکننده رسانا تنها در یکی از فازهای پلیمری است. روش موثرتری که برای کاهش چشمگیر آستانه اتصال استفاده می‌شود، قراردادن پرکننده به صورت گزینشی در فصل مشترک دو فاز پلیمری با شکل‌شناسی هر دو فاز پیوسته است [۲۳]. بر همین اساس ساختار هر دو فاز پیوسته برای طراحی کامپوزیت‌های رسانای گرمایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما، شکل‌شناسی هر دو فاز پیوسته پایدار اغلب در ترکیب‌بندی‌های میانی و محدودی قابل تشکیل است. این موضوع دامنه خواص نهایی قابل دستیابی به این ساختار را محدود می‌کند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند، وجود ذرات در فاز پراکنده می‌تواند در ترکیب‌بندی یکسان ساختار قطره ماتریس را به ساختار هر دو فاز پیوسته تبدیل کند. در صورت وقوع این موضوع، می‌توان در جزء حجمی کمتری از فاز جزئی به شکل‌شناسی هر دو فاز پیوسته دست یافت که نه تنها موجب افزایش دامنه خواص کاربردی می‌شود، بلکه همان‌طور که بیان شد، می‌تواند موجب کاهش آستانه اتصال ذرات در سامانه و افزایش کارایی و بهبود خواص کامپوزیت شود. پلی‌آمید ۶ یک گرمانرم است که به واسطه خواص مطلوب مکانیکی و گرمایی به صورت گسترده در صنعت‌های مختلف استفاده می‌شود. در مقایسه با سایر پلیمرها، پلی‌آمیدها دارای خواص ویژه‌ای مانند استحکام مکانیکی و دمای ذوب زیاد و مقاومت زیاد در برابر خوردگی و سایش است. از طرف دیگر، حساسیت به شکاف، مقاومت ضربه کم و پایداری ابعادی کم موجب محدود شدن کارایی این پلیمر می‌شود. اختلاط پلی‌آمیدها با سایر پلیمرها به ویژه پلی‌اولفین‌ها راهکار مناسبی

برای بهبود این نقاط ضعف است. بنابراین در پژوهش حاضر، از ۲۰٪ پلی‌اولفین الاستومر (ترکیب درصد بهینه) به عنوان فاز جزئی استفاده شد، تا نه تنها موجب اصلاح خواص ماتریس پلیمری شود، بلکه به واسطه اتصال ذرات پرکننده در فصل مشترک فازها، مقدار پرکننده لازم را برای ایجاد رسانندگی گرمایی کاهش دهد. در کار پژوهشی قبلی [۲۴] از ترکیب درصدهای مختلف پرکننده استفاده شد و در ترکیب ۱۰٪ وزنی پرکننده در آمیخته پلیمری مشابه، آستانه نفوذپذیری (رسانایی) حاصل شد. در این پژوهش، از راهکار کاهش آستانه اتصال با قراردادن ذرات پرکننده آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید با نسبت ۲ به ۱ رسانای گرمایی در فصل مشترک پلی‌آمید- پلی‌اولفین الاستومر و تشکیل فاز پیوسته استفاده شد. پژوهشگران در کارهای پژوهشی قبلی [۲۲] به این نتیجه رسیدند، اگر نسبت وزنی پرکننده‌های با اندازه کوچک آلومینیم نیتريد و اندازه بزرگ آلومینیم اکسید ۱:۲ باشد، رسانش‌پذیری گرمایی کامپوزیت بسیار زیاد می‌شود. این ذرات باعث افزایش رسانش‌پذیری گرمایی می‌شوند، در حالی که همچنان عایق الکتریکی باقی می‌مانند. به طور کلی، در این پژوهش هدف اصلی افزایش رسانندگی گرمایی آمیخته پلی‌آمید ۶- پلی‌اولفین الاستومر با راهکار کاهش آستانه اتصال ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید با اندازه و نسبت‌های مختلف است که به دلیل اثرهای هم‌افزایی این راهکار، به افزایش چشمگیر رسانایی گرمایی در درصدهای کم پرکننده منجر خواهد شد. همچنین، برخلاف سایر پژوهش‌های قبلی در این زمینه، محصولی با رسانندگی گرمایی زیاد، خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، سبک و ارزان با حداقل مقدار پرکننده تولید خواهد شد. نتایج با روش‌های میکروسکوپی الکترونی پویشی، میکروسکوپی نیروی اتمی، تجزیه گرمایی، رسانش‌سنجی گرمایی زنون فلش و رتومتري بررسی شدند.

تجربی

مواد

پلی‌آمید ۶ با نام تجاری Tecomid NB40 NL E، فرمول‌بندی $[-(\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO})_n-$ ، از شرکت Eurotech تهیه شد که دارای چگالی 1.13 g/cm^3 ، دمای ذوب 223°C و جرم مولکولی 19547 g/mol بود. پلی‌اولفین الاستومر کوپلیمر پلی‌اتیلن-۱-بوتن با نام تجاری TAFMER DF 7350، جرم مولکولی 84165 g/mol شاخص جریان مذاب 35 g/10min (در شرایط وزنه $2/16 \text{ kg}$ و دمای 190°C)، فرمول شیمیایی $(\text{C}_6\text{H}_{12})_n$ و دمای ذوب 55°C از شرکت

جدول ۱- ترکیب‌بندی نمونه‌ها.

Table 1. Composition of samples.

Sample ID	Formulation (phr)		
	PA/POE/ AlN	PA/POE/ Al ₂ O ₃	PA/POE/ Al ₂ O ₃ /AlN
80-20-AO10	80-20-10	-	-
80-20-BO10	-	80-20-10	-
80-20-CO10	-	-	80-20-10
80-20-AO	-	-	-

میتسو خریداری شد. آلومینیم نیتريد (Al≡N) و آلومینیم اکسید (Al₂O₃) با اندازه متوسط ذرات به ترتیب ۷ و ۳۵ μm از شرکت Sigma-Aldrich تهیه شدند. از نرمال هپتان به عنوان حلال برای استخراج فاز پلی‌اولفین الاستومر و نیز آماده‌سازی نمونه‌ها برای عکس‌برداری استفاده شد. این حلال از شرکت Sigma-Aldrich آلمان خریداری شد. مشخصات و کدگذاری نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

مخلوط‌کن داخلی

برای اختلاط مذاب اجزای پلیمری و پرکننده‌ها از مخلوط‌کن داخلی Brabender ساخت آلمان با گنجایش ۵۵ mL استفاده شد. اختلاط اجزا با تیغه دوغلتکی و سرعت دورانی ۶۰ rpm انجام شد.

دستگاه قالب‌گیری فشاری

برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمون رسانندگی گرمایی و رئومتر، دیسک‌هایی با قطر ۲۵ mm و ضخامت ۲ mm به کمک دستگاه قالب‌گیری فشاری از نوع پرس دستی توپوسیکی ساخت ژاپن تهیه شد. قالب‌گیری در دمای ۲۴۰ °C، فشار ۵۰ MPa و در زمان ۵ min انجام شد. همچنین برای آزمون دینامیکی-مکانیکی نمونه‌هایی با ابعاد ۱/۵×۵ cm به کمک دستگاه قالب‌گیری فشاری تهیه شدند.

نمونه‌سازی

پلی‌آمید به مدت ۲۴ h درون آون خلأ با دمای ۸۰ °C خشک شد. برای تهیه کامپوزیت‌های پلی‌آمید-پلی‌اولفین الاستومر آلومینیم نیتريد و اکسید، پیمانان اصلی (master batch) با غلظت ۵٪ تا ۲۰٪ وزنی (پلی‌اولفین الاستومر) از پرکننده‌ها در مخلوط‌کن داخلی تهیه شد و نانوکامپوزیت‌های نهایی با این پیمانان اصلی تهیه شدند. بدین صورت

که ابتدا پلی‌اولفین الاستومر درون مخلوط‌کن داخلی اضافه شد و سپس آلومینیم نیتريد و اکسید به مدت ۵ min در سرعت دورانی ۵ rpm اضافه شدند. در ادامه، اختلاط به مدت ۸ min در دمای ۲۴۰ °C و سرعت دورانی ۶۰ rpm انجام شد. در قدم بعدی این پیمانان اصلی با اندازه لازم با پلی‌آمید و پلی‌اولفین الاستومر خالص در دمای ۲۴۰ °C، سرعت دورانی ۶۰ rpm به مدت ۷ min برای تهیه نمونه‌های نهایی مخلوط شدند.

مشخصه‌یابی

برای بررسی شکل‌شناسی کامپوزیت‌ها در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی پوشی گسیل میدانی MIRA 3 TESCAN استفاده شد که افزون بر توان تصویربرداری تا بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰۰۰ برابر، قابلیت تصویربرداری در بزرگ‌نمایی‌های زیاد در ولتاژهای بسیار کم با کیفیت مطلوب را دارد. تصویربرداری‌ها در ولتاژ ۷ kV انجام شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های تصویربرداری، ابتدا نمونه‌های قالب‌گیری شده درون نیتروژن مایع شکسته شدند و برای استخراج فاز پلی‌اولفین الاستومر به مدت ۱ h سطح شکست آن‌ها در دمای ۸۰ °C در نرمال هپتان قرار داده شد. سطح شکست سپس با طلا پوشش داده شد و سپس تصویربرداری انجام شد. برای بررسی بهتر مکان‌نگاری (توپوگرافی) سطحی نمونه‌ها از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل Nanowizard ساخت آلمان در شیوه تماسی استفاده شد.

رفتار بلورینگی

رفتار بلورینگی نمونه‌ها با استفاده از گرماسنج پوشی تفاضلی ساخت شرکت Linseise آلمان بررسی شد. این آزمون شامل سه مرحله گرمایش اولیه، سرمایش و گرمایش دوباره است. حدود ۵ mg از نمونه‌ها از دمای محیط تا ۲۴۰ °C در جو نیتروژن و با سرعت گرمادهی ۱۰ °C/10min گرم شدند و در این دما به مدت ۳ min نگه داشته شدند تا تاریخچه گرمایی آن‌ها حذف شود. سپس، با سرعت ۱۰ °C/10min تا دمای ۱۰۰ °C- خنک شدند. گرمادهی دوباره نمونه از دمای ۱۰۰ °C- تا دمای ۲۴۰ °C با سرعت ۱۰ °C/10min انجام شد. درجه بلورینگی پلی‌آمید از معادله (۱) محاسبه شده است:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{0m} \times \phi_{pA6}} \quad (1)$$

در اینجا ΔH_m ، آنتالپی ذوب پلی‌آمید در نمونه‌ها و ΔH_{0m} ، آنتالپی ذوب پلی‌آمید با درصد بلورینگی ۱۰۰ است که برای پلی‌آمید، این مقدار ۱۹۰/۸ J/g در نظر گرفته می‌شود.

آزمون رئولوژی

به مدت ۲ h درون خشکانه قرار گرفتند و با دمای محیط هم‌دم شدند. آزمون چگالی هر نمونه حداقل پنج مرتبه تکرار شد و میانگین آن به عنوان چگالی نهایی گزارش شد.

آزمون گراموزن‌سنجی

برای بررسی پایداری گرمایی نمونه‌ها گراموزن‌سنجی با گراموزن‌سنج STA1000 ساخت شرکت Linseis آلمان در بازه دمایی محیط تا ۷۰۰°C با سرعت گرمادهی ۱۰°C/min و در جو خنثی (تادمای ۵۵۰°C) و سپس در جو اکسیژن (از دمای ۵۵۰°C تا ۷۰۰°C) انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی شکل‌شناسی

اصلی‌ترین نیروی محرکه برای مهاجرت ذرات، تمایل ترمودینامیکی میان ذرات و ماتریس است. عوامل سینتیکی افزون بر تمایلات ترمودینامیکی می‌توانند از رسیدن ذرات به مکان مطلوب ترمودینامیکی جلوگیری کنند. نتایج در پژوهش قبلی [۲۴] به شرح زیر است:

(الف) اگر ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اکسید ابتدا با فاز پلی‌آمید خیس شوند، در این فاز باقی می‌مانند و در نتیجه پراکندگی بیشتری در این فاز مشاهده می‌شود و مهاجرت ذرات به فصل مشترک انجام نمی‌شود.

(ب) وقتی که ذرات به کمک فاز پلی‌اولفین الاستومر خیس می‌شوند، بر اساس محاسبات ترمودینامیکی آن‌ها تمایل دارند که به سطح مشترک مهاجرت کنند. همچنین ذرات خیس شده با پلی‌آمید برای اینکه بتوانند زنجیرهای پلی‌آمید را با زنجیرهای پلی‌اولفین الاستومر جایگزین کنند و در فصل مشترک دوفاز قرار گیرند، به انرژی فعال‌سازی زیادی نیاز دارند که در زمان فرایند مهیا نمی‌شود. بنابراین در این بخش از پژوهش، فقط از پیمانانه اصلی پلی‌اولفین الاستومر دارای ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اکسید استفاده شد تا امکان مهاجرت ذرات به فصل مشترک میسر شود.

در ادامه جاگیری ذرات در سامانه‌های مختلف با میکروسکوپ الکترونی عبوری و میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد. در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه خالص قطره‌های کروی شکل تشکیل شده که این قطره‌های کوچک بیانگر افزایش شکست و تشکیل ساختار قطره ماتریس است [۲۵]. در پژوهش قبلی [۲۴] مشخص شد، با اضافه کردن ۵٪ پرکننده قطره‌ها بزرگ‌تر و کشیده

آزمون‌های دینامیکی پویش بسامد در حالت صفحه‌های موازی (با قطر ۲۵ mm) و فاصله دو صفحه ۱ mm با دستگاه رئومتر MCR 502 ساخت شرکت Anton paar انجام شد. در این آزمون‌ها مدول ذخیره و اتلاف برحسب تابعی از بسامد زاویه‌ای اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری در محدوده بسامد ۱۰۰-۰/۱ rad/s انجام شد. برای بررسی تغییرات خواص گران‌روکشسانی نمونه‌ها طی زمان، آزمون پویش زمانی در دمای ۲۴۰°C در ناحیه گران‌روکشسان خطی در جو نیتروژن و بسامدهای مختلف انجام شد. داده‌های گزارش شده رئولوژیکی میانگین حداقل سه تکرار هستند.

آزمون دینامیکی مکانیکی

آزمون دینامیکی مکانیکی با دستگاه (Q800) TA instrument در حالت پایه و خمشی در بسامد ۱ Hz و کرنش ۱٪ انجام شد. نمونه‌ها از دمای ۱۰۰°C تا دمای ۲۴۰°C با سرعت ۵°C/min گرم شدند و مدول ذخیره و اتلاف و $\tan\delta$ در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. داده‌های گزارش شده میانگین حداقل دو تکرار هستند.

آزمون رسانندگی گرمایی

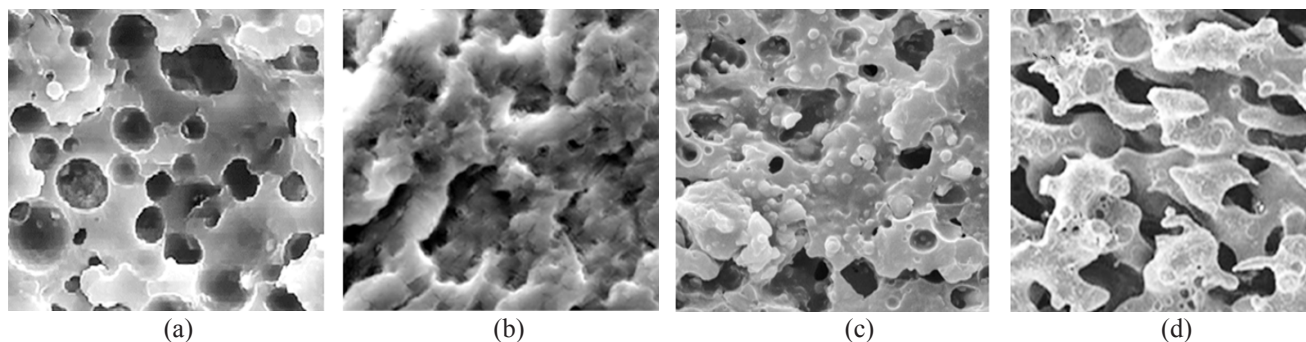
برای بررسی نفوذپذیری گرمایی نمونه‌ها از دستگاه XFA 500 ساخت شرکت Linseise آلمان استفاده شد. نمونه‌های به صورت دیسکی با قطر ۲۵ mm و ضخامت ۲ mm آماده‌سازی و با گرافیت پوشش‌دهی شدند. تمام نمونه‌ها در خلأ و در دمای محیط تا ۱۰۰°C با سرعت گرمادهی ۲°C/min آزمون شدند. در هر دما حداقل ۱۰ پالس زنون روی نمونه‌ها زده شد و میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد. برای محاسبه رسانندگی گرمایی از معادله (۲) استفاده شد:

$$K = \alpha \times C_p \times \rho \quad (2)$$

در این معادله، α ضریب نفوذپذیری گرمایی (cm^3/s)، C_p ظرفیت گرمایی (J/g)، ρ چگالی (g/cm^3) و K رسانش‌پذیری گرمایی (W/K.m) است. آزمون رسانندگی گرمایی هر نمونه حداقل پنج مرتبه تکرار شده و میانگین آن گزارش شد.

تعیین چگالی

برای تعیین چگالی نمونه‌ها از روش غوطه‌وری استفاده شد، بدین ترتیب که نمونه‌هایی با وزن حدود ۳ g و مربع‌شکل آماده‌سازی شدند و پیش از انجام آزمون به مدت ۲۴ h درون آون با دمای ۸۰°C و سپس



شکل ۱- تصاویر FE-SEM نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی $10\ \mu\text{m}$: (a) 80-20-AO، (b) 80-20-AO10، (c) 80-20-BO10، و (d) 80-20-CO10. Scale-bars are $10\ \mu\text{m}$.

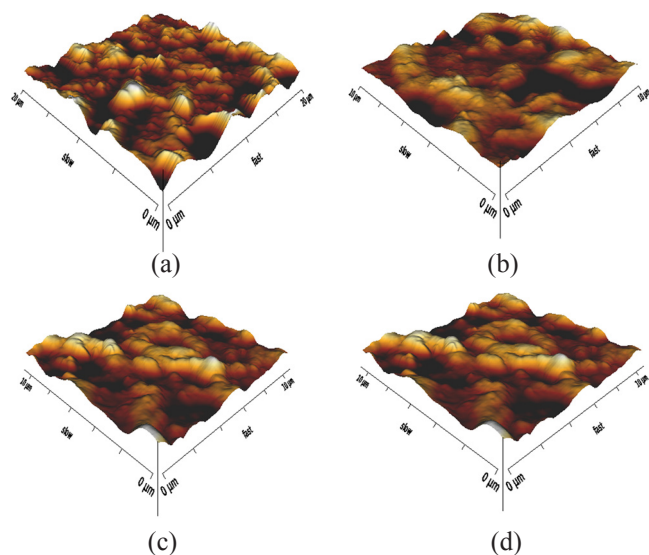
اصلی در دماهای 45°C و 80°C دیده می‌شوند که به ترتیب دمای گذار شیشه‌ای پلی‌اولفین الاستومر و پلی‌آمید هستند. Nesterov و همکاران [27] نشان دادند، ذراتی که در فصل مشترک مهاجرت کرده‌اند، می‌توانند با تغییر در انرژی آزاد اختلاط باعث افزایش انحلال‌پذیری شوند. در صورتی که انرژی آزاد برهم‌کنش منفی باشد، یا به عبارتی اگر ذرات با زنجیرهای پلیمری برهم‌کنش خوبی داشته باشند، پایداری ترمودینامیکی و انحلال‌پذیری اجزا در سطح مشترک افزایش می‌یابد. بدین ترتیب انتظار می‌رود، در صورت جاگیری ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اکسید در فصل مشترک و افزایش انحلال‌پذیری در کامپوزیت‌ها، دمای گذار شیشه‌ای پلی‌آمید پهن‌تر

می‌شوند. با افزایش مقدار پرکننده تا ۱۰٪، این قطره‌های کشیده‌شده با یکدیگر ادغام و تشکیل ساختار هر دو فاز پیوسته را می‌دهند. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی در نمونه‌های 80-20-AO10 و 80-20-BO10 و نیز 80-20-CO10 شکل‌گیری ساختار هر دو فاز پیوسته به خوبی قابل دیدن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نواحی فاز پلی‌اولفین الاستومر کشیده‌شده با یکدیگر ادغام و تشکیل یک فاز پیوسته را در سامانه داده‌اند. در شکل ۱ (d) مربوط به نمونه 80-20-CO10، پیوستگی فازها به وضوح بزرگ‌تر از نمونه‌های قبلی است. این تغییر شکل‌شناسی به واسطه شکل‌گیری نواحی کشیده‌شده پلی‌اولفین الاستومر بوده که حاصل اثر ذرات بر گرانروی و کشسانی این فاز است. بنابراین ساختار نهایی کامپوزیت‌های دارای پرکننده و کنترل محل قرارگیری ذرات پرکننده می‌تواند به یک ساختار هر دو فاز پیوسته پایدار منجر شود.

در ادامه، بررسی مکان‌نگاری (توپوگرافی سطحی) نمونه‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، خطوط زردرنگ به فاز پلی‌اولفین الاستومر با کمترین سختی، نواحی قهوه‌ای‌رنگ به پلی‌آمید و نواحی تیره‌رنگ به پرکننده با بیشترین سختی مربوط هستند. در شکل‌های ۲ (b) و (c) و (d) برخلاف شکل ۲ (a) پیوستگی بین نواحی سیاه‌رنگ دیده می‌شود که نشان‌دهنده ایجاد پیوستگی میان ذرات در مجاور فازهاست. همچنین، پیوستگی در نواحی زرد و قهوه‌ای‌رنگ نیز بیانگر پیوستگی بین فازهاست. این نتایج تأییدکننده نتایج میکروسکوپ الکترونی هستند [26].

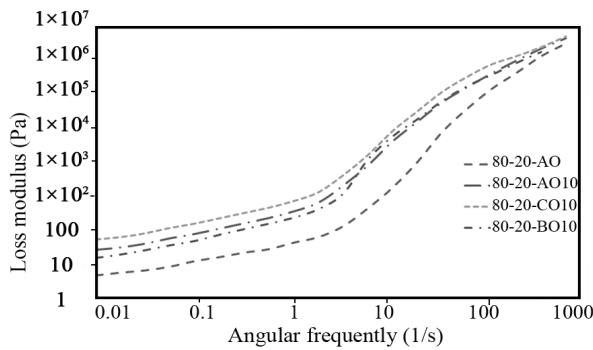
اثر جاگیری ذرات بر پاسخ گرمایی مکانیکی

برای بررسی بیشتر جاگیری ذرات در نمونه‌ها، خواص دینامیکی مکانیکی اندازه‌گیری شد، زیرا تصاویر میکروسکوپ الکترونی فقط مؤید بخش کوچکی از نمونه‌ها هستند. در تمام نمونه‌ها دو پیک

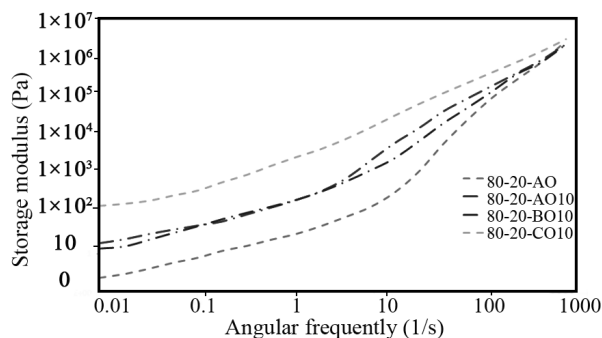


شکل ۲- تصاویر AFM با بزرگ‌نمایی $10\ \mu\text{m}$: (a) 80-20-AO، (b) 80-20-AO10، (c) 80-20-BO10، و (d) 80-20-CO10. Scale-bars are $10\ \mu\text{m}$ for all samples).

Fig. 2. AFM graphs of samples: (a) 80-20-AO, (b) 80-20-AO10, (c) 80-20-BO10, and (d) 80-20-CO10, (Scale-bars are $10\ \mu\text{m}$ for all samples).



(a)

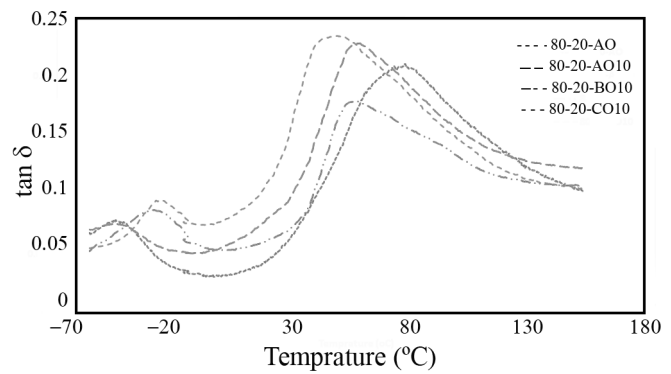


(b)

شکل ۴- (a) مدول ذخیره و (b) اتلاف نمونه‌ها.

Fig. 4. (a) Storage modulus and (b) loss modulus of samples.

اکسید نشان می‌دهد. نمونه خالص دارای رفتار گران‌رو ($G'' > G'$) بوده که مطابق با رفتار شکل‌شناسی قطره-ماتریس تشکیل شده در این نمونه است. در نمونه خالص محل تلاقی G' و G'' در بسامد حدود ۱ Hz است و در بسامدهای کمتر از آن $G'' < G'$ است و پس از محل تلاقی دارای رفتار گران‌رو ($G'' > G'$) است. با افزودن ذرات آلومینیم نیترید و آلومینیم اکسید به پلی‌آمید این محل تلاقی به بسامدهای کمتر جابه‌جا می‌شود که بیانگر افزایش سازگاری بین فازهاست. در نمونه‌های 80-20-BO10، 80-20-AO10 و 80-20-CO10 رفتار شبه‌جامد دیده می‌شود که به دلیل ایجاد ساختار هر دو فاز پیوسته با سطح مشترک زیاد است. در مقایسه، نمونه 80-20-CO10 دارای مدول ذخیره بیشتری نسبت به سایر نمونه‌هاست. این موضوع به دلیل جاگیری ذرات بیشتری در فصل مشترک اجزا و ایجاد ساختار قوی‌تر است. به عبارتی با وجود ذرات آلومینیم نیترید و اکسید به صورت هم‌زمان و شکل‌گیری نواحی فازی کشیده‌شده، رفتار شبه‌جامد دیده شده و مدول ذخیره به مقادیر بیشتر منتقل می‌شود که حاکی از افزایش استحکام شبکه سه‌بعدی از ذرات پرکننده در سامانه نام‌برده است. به طور کلی، روند افزایش مقدار ناحیه مسطح مدول ذخیره نیز تشکیل



شکل ۳- تجزیه مکانیکی دینامیکی نمونه‌ها.

Fig. 3. Dynamic mechanical analysis of samples.

شود و کاهش یابد. زیرا، تعداد زنجیرهای پلی‌آمید با دمای گذار شیشه‌ای کمتر افزایش یافته است. از طرفی وجود ذرات در فصل مشترک باعث افزایش دمای گذار شیشه‌ای فاز پلی‌اولفین الاستومر نیز خواهد شد. نتایج آزمون ترمودینامیکی در شکل ۳ نشان می‌دهد، در نمونه خالص 80-20-AO دو پیک اصلی در دماهای ۴۵- و ۸۰ °C مشاهده می‌شود. با افزایش ۱۰٪ پرکننده پیک پلی‌آمید کمی به کمتر و پیک مربوط به پلی‌اولفین الاستومر کمی به دماهای بیشتر منتقل شده است. اما با افزایش درصد ذرات این دو پیک پهن‌تر شده و به یکدیگر نزدیک شده‌اند. این مشاهدات بیانگر وجود ذرات در فصل مشترک و افزایش انحلال‌پذیری (سازگاری) اجزای پلیمری است. افزون بر این، وجود ذرات آلومینیم نیترید و آلومینیم اکسید به طور هم‌زمان نیز باعث نزدیکی بیشتر پیک پلی‌آمید و پلی‌اولفین الاستومر به یکدیگر شده است که بیانگر افزایش سازگاری دو فاز نسبت به وجود ذرات به تنهایی در سامانه است. به طور کلی این نتایج مؤید مهاجرت ذرات از فاز پلی‌اولفین الاستومر به فصل مشترک و بهبود برهم‌کنش بین فازهاست.

خواص رئولوژیکی سامانه

براساس پژوهش‌های انجام‌شده [۲۸] پراکنش بهتر ذرات صفحه‌ای مانند نانورس موجب افزایش مدول ذخیره و ایجاد ناحیه مسطح با مقدار بیشتری می‌شود. در نمونه‌های 80-20-AO10 و 80-20-BO10 نمودار مدول اتلاف و ذخیره زاویه‌های کمتری نسبت به محور Xها دارند که به دلیل وجود ذرات در فصل مشترک و ایجاد ساختار است. اما، در نمونه 80-20-CO10 این زاویه کاهش پیدا کرده که بیانگر جاگیری نانوذرات در فصل مشترک دو فاز است. شکل ۴ مدول ذخیره و اتلاف را در ناحیه گران‌روکشسان خطی برحسب بسامد برای سامانه ۲۰/۸۰ دارای ۱۰٪ وزنی آلومینیم نیترید و آلومینیم

جدول ۲- نتایج گرماسنجی پویشی تفاضلی.

Table 2. DSC analysis.

Sample code	T _m (°C)	T _{m2} (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)	ΔH _c (J/g)	X _c (%)	std
PA6	218.81±0.01	-	192.1±0.01	99.80±0.01	87.70±0.01	52.30±0.01	0.129
80-20AO	219.34±0.01	-	192.1±0.01	79.31±0.01	74.24±0.01	51.95±0.01	0.454
80-20-AO10	220.08±0.01	-	191.9±0.01	63.41±0.01	61.02±0.01	41.54±0.01	0.258
80-20-BO10	220.12±0.01	-	192.0±0.01	64.27±0.01	62.88±0.01	42.10±0.01	0.081
80-20-CO10	219.81±0.01	-	191.8±0.01	55.50±0.01	53.17±0.01	36.36±0.01	0.339

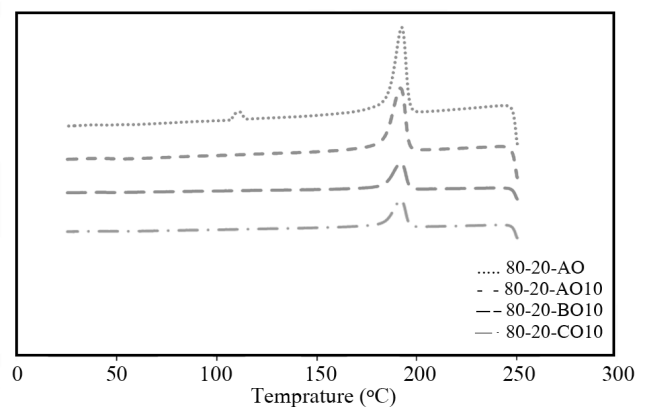
فقط بلورینگی پلی‌آمید ۶ بررسی شده است. بلورینگی و نتایج حاصل از گرماسنجی پویشی تفاضلی و انحراف استاندارد درصد بلورینگی در جدول ۲ و شکل ۵ خلاصه شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود، با اضافه کردن فاز پلی‌اولفین الاستومر به فاز پلی‌آمید بلورینگی پلی‌آمید کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در نمونه‌های خالص مشهود است. در نمونه خالص یک پیک کوچک در دمای ۱۱۲ °C ایجاد می‌شود که به بلورینگی تفکیک شده فاز پلی‌آمید مربوط است. این رفتار بلورینگی در آمیزه‌ها با شکل‌شناسی قطره ماتریس جایی رخ می‌دهد که تعداد عوامل هسته‌زای ناهمگن از تعداد قطره‌ها بیشتر است، این فرایند دارای دمای بلورینگی کمتری است و موجب پیدایش پیک در دماهای کم می‌شود. طبق مشاهدات شکل‌شناسی، در این نمونه ساختار هر دو فاز پیوسته تشکیل شده حین اختلاط به ساختار قطره ماتریس شکسته می‌شود.

مطابق با نتایج جدول ۲، درصد بلورینگی در نمونه‌های 80-20-BO10، 80-20-AO10 و 80-20-CO10 کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش سطح مشترک فاز پلی‌اولفین الاستومر با پلی‌آمید به واسطه تشکیل شکل‌شناسی هر دو فاز پیوسته پایدار است. به‌طور کلی در آمیزه‌های پلیمری به‌منظور رشد گویچه‌ها (spherulite)، فازی که قابلیت بلورینگی دارد، باید فاز دیگر را پس بزند. با افزایش سطح مشترک، انرژی لازم برای این فرایند افزایش و به دنبال آن بلورینگی کاهش می‌یابد. فصل مشترک پلی‌اولفین الاستومر و پلی‌آمید نمی‌تواند به‌عنوان عامل هسته‌زا عمل کند و فرایند بلورینگی را سرعت ببخشد، زیرا دمای بلورینگی در آمیخته‌های خالص دوتایی تفاوتی با پلی‌آمید خالص ندارد. کاهش بلورینگی در نمونه 80-20-CO10 بیشتر از سایر نمونه‌هاست که به دلیل افزایش فصل مشترک در نمونه دارای ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به‌طور هم‌زمان است. در حالی که در نمونه‌های دارای فقط آلومینیم نیتريد یا اکسید

شبکه سه‌بعدی قوی‌تری را در نمونه 80-20-CO10 نشان می‌دهد. همچنین مقایسه مدول ذخیره سامانه نشان می‌دهد، کاهش مدول ذخیره در مقدار پرکننده یکسان برای 80-20-CO10 کمتر از سایر نمونه‌هاست که به دلیل فصل مشترک بیشتر (پیوستگی بیشتر) در این سامانه است. بدین ترتیب نمونه 80-20-CO10 به دلیل پیوستگی فازی بیشتر و نیز قرارگرفتن ذرات ریز و درشت پرکننده‌های آلومینیم نیتريد و اکسید در سطح مشترک فازها دارای بهترین خواص رئولوژیکی است. روند افزایش مقدار ناحیه مسطح مدول ذخیره نیز تشکیل شبکه سه‌بعدی قوی‌تری را در نمونه 80-20-CO10 نشان می‌دهد. این نتایج، مشاهدات مبنی بر افزایش پیوستگی فاز پلی‌اولفین الاستومر و ایجاد مسیر پیوسته بین ذرات در نمونه نام‌برده را تأیید می‌کند.

رفتار بلورینگی در سامانه

پلی‌اولفین الاستومر دارای بلورینگی بسیار کمی است و در این بخش



شکل ۵- منحنی سرمایش نمونه‌ها در گرماسنجی پویشی تفاضلی.

Fig. 5. Cooling curve of samples from differential scanning calorimeter.

جدول ۳- رسانندگی گرمایی نمونه‌ها.

Table 3. Thermal conductivity of samples.

Sample code	Thermal diffusivity (cm ² /s)	Density (g/cm ³)	Heat capacity (J/g.°C)	Thermal conductivity (W/m.K)	std
80-20AO	0.0021±0.0005	1.08±0.01	2.07±0.01	0.46±0.01	0.0239
80-20-AO10	0.0095±0.0005	1.20±0.01	1.95±0.01	2.22±0.01	0.0652
80-20-BO10	0.0066±0.0005	1.24±0.01	1.70±0.01	1.39±0.01	0.0292
80-20-CO10	0.0185±0.0005	1.28±0.01	1.41±0.01	3.34±0.01	0.0245

مقدار فشردگی است که در نتیجه باعث تشکیل زنجیره گرمایی و کاهش آستانه نفوذپذیری ذرات شده است. ذرات آلومینیم نیتريد نیز دارای حالت بی‌شکل هستند که با افزودن ذرات آلومینیم کروی شکل، تماس بین ذرات بیشتر می‌شود و در نتیجه باعث افزایش رسانندگی گرمایی نمونه‌ها می‌شود. به عبارتی در سامانه 80-20-CO10 بیشترین رسانندگی گرمایی مشاهده شد که به واسطه تشکیل ساختار هر دو فاز پیوسته در کسر حجمی کمتری از فاز پلی‌اولفین الاستومر است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور افزایش رسانش پذیری گرمایی آمیخته پلی‌آمید ۶ و پلی‌اولفین الاستومر (۲۰/۸۰)، از قرار دادن پرکننده‌های رسانا به‌طور گزینشی در سطح مشترک دو پلیمر و ایجاد فاز پیوسته پایدار استفاده شد. بدین منظور ۱۰٪ وزنی ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به‌تنهایی و هم‌زمان با نسبت به‌ترتیب ۲ به ۱ و اندازه ذرات متفاوت به‌کار گرفته شدند. نتایج میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهند، وجود ۱۰٪ وزنی از ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اکسید به‌تنهایی باعث ایجاد یک فاز پیوسته می‌شود، اما وجود توأم ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید باعث افزایش پیوستگی بین دو فاز شده است. نتایج رسانش‌سنجی گرمایی نشان می‌دهد، رسانایی گرمایی 80-20-AO10 و 80-20-BO10، دارای ۱۰٪ وزنی تک‌پرکننده، به‌ترتیب ۴/۸ و ۳ برابر بیشتر از نمونه خالص است. در حالی که در 80-20-CO10 دارای ۱۰٪ وزنی آلومینیم نیتريد (AlN) و پرکننده آلومینیم اکسید (Al₂O₃) به‌ترتیب با نسبت ۲ به ۱، رسانش گرمایی ۷/۲۳ برابر بیشتر از نمونه‌های خالص است. به‌عبارتی رسانندگی گرمایی نمونه دارای ذرات آلومینیم نیتريد و

با مقادیر یکسان تغییر چندانی در اعداد کاهش یافته دیده نشد. به‌طور کلی، نتایج رفتار بلورینگی نمونه‌ها بیانگر پیوستگی بیشتر فازها در نمونه 80-20-CO10 است که نتایج رئولوژیکی و شکل‌شناسی را تأیید می‌کند و انتظار می‌رود، به‌دلیل جهت‌یابی ذرات در فصل مشترک فازها، بیشترین مقدار رسانندگی گرمایی در این نمونه دیده شود، بدین منظور رسانندگی گرمایی در بخش بعدی بررسی شده است.

بررسی رسانندگی گرمایی سامانه

همان‌طور که در بخش مشخصه‌یابی اشاره شد، برای محاسبه ضریب رسانندگی گرمایی نمونه‌ها، باید ضریب نفوذپذیری گرمایی، چگالی و ظرفیت گرمایی سامانه اندازه‌گیری شوند، مقادیر نام‌برده به‌همراه انحراف استاندارد ظرفیت گرمایی در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. ضریب نفوذپذیری گرمایی نمونه‌های دارای ذرات پرکننده، به مقدار شایان توجهی بیشتر از نمونه خالص است. در نمونه 80-20-AO10 رسانندگی گرمایی ۶/۱۶ برابر بیشتر از پلی‌آمید و ۴/۸ برابر بیشتر از نمونه خالص و در نمونه 80-20-BO10 رسانندگی گرمایی ۳/۸۶ برابر پلی‌آمید و ۳ برابر بیشتر از نمونه خالص شدند که به‌دلیل ایجاد آستانه نفوذپذیری در این نمونه‌هاست. در نمونه 80-20-CO10 رسانندگی گرمایی ۹/۲۵ برابر پلی‌آمید و ۷/۲۳ برابر نمونه خالص ارتقا یافت. پژوهشگران اثبات کردند [۲۲] وقتی از ذرات پرکننده با اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود، رسانش‌پذیری گرمایی پلی‌آمید بیشتر از زمانی است که اندازه‌ها یکسان باشند، زیرا ذرات پرکننده ریزحفره‌های بین پرکننده‌های بزرگ را پر می‌کنند و باعث کاهش تداخل میان پرکننده‌ها و تشکیل زنجیره گرمایی می‌شوند. از آنجا که این پژوهش در راستای نتایج بهینه به‌دست‌آمده در مقاله مزبور است، می‌توان استنباط کرد، افزایش شایان توجه رسانندگی گرمایی در نمونه 80-20-CO10 بیانگر کاهش تداخل بین پرکننده‌ها و افزایش

خالص است که به دلیل افزایش سطح مشترک فاز پلی‌اولفین الاستومر با پلی‌آمید به واسطه تشکیل شکل‌شناسی هر دو فاز پیوسته پایدار است. کاهش بلورینگی در نمونه 80-20-CO10 بیشتر از سایر نمونه‌هاست که به دلیل افزایش فصل مشترک در نمونه دارای ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به صورت توأم است. به طور کلی، در این پژوهش رسانندگی گرمایی آمیخته پلی‌آمید ۶-پلی‌اولفین الاستومر با راهکار کاهش آستانه اتصال به مقدار شایان توجهی افزایش یافت که می‌تواند نویدبخش طراحی و ساخت کامپوزیت‌های رسانای گرمایی با خواص مکانیکی مطلوب، سبک و ارزان با فرایندپذیری خوب باشد.

مراجع

- Mumtaz N., Li Y., Artiaga R., Farooq Z., Mumtaz A., Guo Q., and Un-Nisa F., Fillers and Methods to Improve the Effective (out-plane) Thermal Conductivity of Polymeric Thermal Interface Materials—A Review, *Heliyon*, **10**, e25381, 2024.
- Baruch A.-E., Bielenki L., and Regev O., Thermal Conductivity Improvement of Electrically Nonconducting Composite Materials, *Rev. Chem. Eng.*, **28**, 61-71, 2012.
- Idumah C.I. and Hassan A., Recently Emerging Trends in Thermal Conductivity of Polymer Nanocomposites, *Rev. Chem. Eng.*, **32**, 413-457, 2016.
- Burger N., Laachachi A., Ferriol M., Lutz M., Toniazzi V., and Ruch D., Review of Thermal Conductivity in Composites: Mechanisms, Parameters and Theory, *Prog. Polym. Sci.*, **61**, 1-28, 2016.
- He L., Zhang W., Liu X., and Tong L., Substantial Improvement of Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Polymer Composites by Incorporation of Boron Nitride Nanosheets and Modulation of Thermal Curing Reaction, *Polym. Compos.*, **45**, 2215-2231, 2024.
- Chen H., Ginzburg V.V., Yang J., Yang Y., Liu W., Huang Y., Du L., and Chen B., Thermal Conductivity of Polymer-Based Composites: Fundamentals and Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **59**, 41-85, 2016.
- Sun Y., Zhou L., Han Y., and Cui L., Numerical Analysis on the Direction to Improve Thermal Conductivity of Polymer Composites Filled with Spherical Particles, *Comput. Mater. Sci.*, **233**, 112697, 2024.
- Šupová M., Martynková G.S., and Barabaszová K., Effect of Nanofillers Dispersion in Polymer Matrices: A Review, *Sci. Adv. Mater.*, **3**, 1-25, 2011.
- Gaxiola D.L., Keith J.M., King J.A., and Johnson B.A., Nielsen Thermal Conductivity Model for Single Filler Carbon/Polypropylene Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **114**, 3261-3267, 2009.
- Ma A., Chen W., Hou Y., and Zhang G., The Preparation and Cure Kinetics Researches of Thermal Conductivity Epoxy/AlN Composites, *Poly.-Plast. Technol. Eng.*, **49**, 354-358, 2010.
- Chen S., Xu N., Gorbatiikh L., and Seveno D., Find the Maximum Thermal Conductivity of Graphene Reinforced Polymer Composite: A Molecular Dynamics Approach, *Polym. Compos.*, **45**, 302-314, 2024.
- Hadaeghnia M., Ahmadi S., Ghasemi I., and Wood-Adams P.M., Fractal Structures of PA6/POE Blend Nanocomposites and Their Dynamic Properties, *J. Rheol.*, **67**, 183-196, 2023.
- Diez-Pascual A.M., Guan J., Simard B., and Gómez-Fatou M.A., Poly(phenylene sulphide) and Poly(ether ether ketone) Composites Reinforced with Single-Walled Carbon Nanotube Buckypaper: II—Mechanical Properties, Electrical and Thermal Conductivity, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **43**, 1007-1015, 2012.
- Aliev A.E., Lima M.H., Silverman E.M., and Baughman R.H., Thermal Conductivity of Multi-Walled Carbon Nanotube Sheets: Radiation Losses and Quenching of Phonon Modes, *Nanotechnology*, **21**, 035709, 2009.
- Jia Y., He H., Yu P., Chen J., and Lai X., Synergistically Improved Thermal Conductivity of Polyamide-6 with Low Melting Temperature Metal and Graphite, *Express Polym. Lett.*, **10**, 679-692, 2016.
- Gaska K., Rybak A., Kapusta C., Sekula R., and Siwek A., En-

- hanced Thermal Conductivity of Epoxy-Matrix Composites with Hybrid Fillers, *Polym. Adv. Technol.*, **26**, 26-31, 2015.
17. Choi S.W., Yoon K.H., and Jeong S.-S., Morphology and Thermal Conductivity of Polyacrylate Composites Containing Aluminum/Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **45**, 1-5, 2013.
 18. Lee E.S., Lee S.M., Shanefield D.J., and Cannon W.R., Enhanced Thermal Conductivity of Polymer Matrix Composite via High Solids Loading of Aluminum Nitride in Epoxy Resin, *J. Am. Ceramic Soc.*, **91**, 1169-1174, 2008.
 19. Altay L., Seki Y., Sever K., Sen I., Uysalman T., Atagur M., and Sarikanat M., Thermal, Electrical, and Mechanical Properties of Various Thermal Conductive Powder Filled Polyamide 6 Composite Materials for Thermal Management Applications, *Acta Physica Polonica, A*, 134, 2018.
 20. Yuan D., Gao Y.F., Guo Z.X., and Yu J., Improved Thermal Conductivity of Ceramic Filler-Filled Polyamide Composites by Using PA6/PA66 1:1 Blend as Matrix, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 45371, 2017.
 21. Xiao C., Leng X., Zhang X., Zheng K., and Tian X., Improved Thermal Properties by Controlling Selective Distribution of AlN and MWCNT in Immiscible Polycarbonate (PC)/Polyamide 66 (PA66) Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **110**, 133-141, 2018.
 22. Li D., Zeng D., Chen Q., Wei M., Song L., Xiao C., and Pan D., Effect of Different Size Complex Fillers on Thermal Conductivity of PA6 Thermal Composites, *Plast. Rubber Compos.*, **48**, 347-355, 2019.
 23. Yenier Z., Seki Y., Aker S., Öner F., Altay L., and Sarikanat M., The Effect of Hybrid Thermal Fillers on Thermal Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polybutylene Terephthalate Composites, *Polym. Int.*, **73**, 484-493, 2024.
 24. Shahmir M., Ahmadi S., and Arabi H., Improved Thermal Conductivity of Immiscible Polyamide 6 (PA6)/Polyolefin Elastomer (POE) Blend by Controlling Selective Localization of Aluminum Nitride (AlN), *Iran. Polym. J.*, **33**, 1-10, 2024.
 25. DeRoussel P., Khakhar D., and Ottino J., Mixing of Viscous Immiscible Liquids. Part I: Computational Models for Strong-Weak and Continuous Flow Systems, *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 5511-5529, 2001
 26. Modarresi-Alam A.R., Soleimani M., Pakseresht M., Farzaneh-Jobaneh E., Zeraatkar V., Tabatabaei F.A., Shabzendedar S., and Movahedifar F., Preparation of New Conductive Nanocomposites of Polyaniline and Silica under Solid-State Condition, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **29**, 387-398, 2016.
 27. Nesterov A. and Lipatov Y., Compatibilizing Effect of a Filler in Binary Polymer Mixtures, *Polymer*, **40**, 1347-1349, 1999.
 28. Cassagnau P., Melt Rheology of Organoclay and Fumed Silica Nanocomposites, *Polymer*, **49**, 2183-2196, 2008.